文章编号:1000-4939(2023)04-0805-09

# 热处理对 TC4 钛合金动态力学性能和微观组织的影响

刘涛[1,2],柏威[1],吴乔国[3],孙虹[1,2],雷经发[1,2]

(1. 安徽建筑大学机械与电气工程学院,230601 合肥;2. 灾害环境人员安全安徽省重点实验室,230601 合肥;3. 合肥工业大学土木与水利工程学院,230009 合肥)

**摘　要**:为揭示热处理对 TC4 钛合金动态力学性能及微观组织的影响,选取 2 种典型热处理方式和 5 种加载应变率开展了 TC4 钛合金试样的动态力学性能实验,获取了动态应力-应变数据,并进行了试样的 XRD 和金相分析。结果表明:高应变率下 TC4 钛合金应变率强化效应显著。时效处理后,TC4 钛合金流动应力、屈服强度及抗压强度得到提升,而固溶时效处理后上述性能降低。时效处理和未热处理试样应力-应变曲线均具有弹性、屈服和塑性阶段,而固溶时效处理后无明显弹性和屈服阶段。固溶时效处理后流动应力随应变率增加而增加,时效处理和未热处理试样流动应力无明显变化。时效处理后试样等轴初生 α 相显著增大且 β 相含量较低,固溶时效处理后 α 相晶界增大且含有针状 α 的 β 转变基体,TC4 钛合金力学性能与 β 相和亚稳 β 相的马氏体转变有关。

**关键词**:TC4 钛合金;固溶处理;时效处理;动态力学性能;金相组织

**中图分类号**:V252.2;TG166.5　**文献标志码**:A　**DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.04.009

# Effects of heat treatment on dynamic mechanical properties and microstructure of TC4 titanium alloy

LIU Tao[1,2], BAI Wei[1], WU Qiaoguo[3], SUN Hong[1,2], LEI Jingfa[1,2]

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, 230601 Hefei, China;
2. Anhui Province Key Laboratory of Human Safety, 230601 Hefei, China;
3. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, 230009 Hefei, China)

**Abstract**: In order to reveal the effects of heat treatment on the dynamic mechanical properties and microstructure of TC4 titanium alloy, two typical heat treatment methods and five strain rates were selected to carry out the dynamic mechanical properties experiments of TC4 titanium alloy specimens. The dynamic stress-strain data were obtained, and XRD and metallographic analyses of the specimens were conducted. Results show that the strain rate strengthening effect of TC4 titanium alloy is significant at a high strain rate. After aging treatment, flow stress, yield strength and compressive strength of TC4 titanium alloy are

**收稿日期**:2022-04-26　**修回日期**:2022-06-24

**基金项目**:国家自然科学基金资助项目(No. 51805003);安徽省高校优秀拔尖人才培育资助项目(No. gxyqZD2019057);灾害环境人员安全安徽省重点实验室开放课题资助项目(No. DEPS-2021-02)

**通信作者**:刘涛,博士,副教授。E-mail:tao.liu@ahjzu.edu.cn

**引用格式**:刘涛,柏威,吴乔国,等. 热处理对 TC4 钛合金动态力学性能和微观组织的影响[J]. 应用力学学报,2023,40(4):805-813.
LIU Tao, BAI Wei, WU Qiaoguo, et al. Effect of heat treatment on dynamic mechanical properties and microstructure of TC4 titanium alloy[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(4):805-813.

improved, while the above-mentioned properties are reduced after solution aging treatment. The stress-strain curves of both aged and untreated specimens exhibit elastic, yield and plastic stages, while there are no obvious elastic or yield stages after solution aging treatment. After solution aging treatment, the flow stress increases with the increase of strain rate, and there is no significant change in the flow stress of the aged and untreated specimens. After aging treatment, the equiaxed primary α phase of the specimen increases significantly and the content of β phase is low. After solution-aging treatment, the grain boundary of α phase increases and β matrix containing needle-like α appears. The mechanical properties of TC4 titanium alloy are related to the martensitic transformation of β phase and metastable β phase.

**Key words**: TC4 titanium alloy; solution treatment; aging treatment; dynamic mechanical property; metallographic structure

TC4 钛合金(Ti-6-Al-4V)是一种兼有 α 及 β 相的两相钛合金材料,其具有良好的工艺塑性和超塑性、抗腐蚀能力强、冲击韧性好[1-3],常用于航空发动机压气机叶片、飞机梁结构连接件等承力构件。在服役过程中,TC4 钛合金构件常承受强冲击载荷作用,存在高应变率下的塑性变形风险,因此获取材料的动态力学性能,揭示热处理工艺对其动态力学性能和微观组织的影响对于开展钛合金抗冲击设计、提高结构冲击强度意义重大。

在钛合金力学性能研究方面,人们结合万能材料试验机、分离式霍普金森杆等装置开展了该类材料的静动态力学性能实验,并结合有限元分析工具进行了材料性能的数值模拟[4],研究了固溶、时效等热处理工艺[5-8]对材料静、动态力学性能的影响。证实了固溶温度在相变点附近时会改变钛合金动态压缩性能且时效处理会提高钛合金的动态屈服强度。在 $10^{-4} \sim 10^3 s^{-1}$ 应变率范围内,该材料具有明显的应变率强化效应和一定的应变硬化效应[9-10]。

为研究热处理工艺对材料微观组织的影响,加热温度、冷却速度及方式常被作为调控变量,以明确不同热处理方案对材料组织相变的作用机制,揭示了空冷固溶处理后[11]的二次针状 α 相析出以及水冷固溶时效后[12-15]的组织形态规律,随着时效温度的升高,TC4 钛合金的准静态抗拉强度先升后降[16-18]。微观组织转变会影响钛合金力学性能,如 β 相的含量对 TC4 合金的热塑性变形起着重要作用[19],700 ℃固溶处理后 TB6 钛合金强度降低,而 750 ℃及以上固溶处理会使其强度提升[20]。双态组织状态下的 TC4 钛合金的动态抗压强度与转变 β 区体积分数有关[21],次生 α 相的含量越多,材料硬度越高[22],完全退火后 Ti53 合金强度和硬度较低,塑韧性较高[23]。此外,成型方式也会对力学性能产生影响。与传统锻件相比,采用 SLM 工艺制备的 TC4 钛合金具有更强的耐蚀性[24-26],而 SLM 制备的 TC4-5Cu 抗腐蚀性能随能量密度降低而下降[27]。在准静态和动态加载条件下,930 ℃热轧 TC4 钛合金表现出显著的各向异性,沿轧向加载体现出了高塑性,沿横向加载则具有较高的静、动态屈服强度[28],冷轧条件下,该材料塑性与退火温度存在关联[29-31]。

目前,国内外学者结合各类钛合金材料开展了一定应变率范围的力学性能测试。然而热处理工艺带来的微观组织的变化以及微观组织演化与材料动态力学性能之间的关联规律仍不明确。本研究选取分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)实验装置开展了 TC4 钛合金试样在高应变率下的力学性能实验,获取了材料经时效、固溶时效等典型热处理后的动态应力-应变数据,分析了热处理对材料动态力学性能的影响,并阐述了微观组织演化与动态力学性能之间的关联规律。

## 1 实验材料及装置

### 1.1 实验材料

实验材料为商用冷轧态 TC4 钛合金棒材。采用线切割方法将其制成圆柱状试样($\Phi$4 mm × 4 mm),化学成分见表 1。

表 1 TC4 钛合金的化学成分(质量分数,%)

Tab. 1 Chemical composition of TC4 titanium alloy (mass fraction, %)

| C | H | O | N | V | Si | Fe | Al | Ti |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.08 | 0.015 | 0.2 | 0.05 | 3.42 | 0.29 | 0.28 | 6.55 | Bal. |

对试样进行磨制加工,使其两面平行。按表 2 所示热处理工艺对磨制后试样进行热处理。试样分

为 4 组,分别对应 4 种工艺:工艺 1 不做热处理;工艺 2 为时效处理,试样以 10 ℃/min 的升温速率加热至 450 ℃,保温 4 h 后空冷;工艺 3 与工艺 4 为固溶时效处理,分别将试样以 10 ℃/min 的升温速率加热至 920 ℃和 960 ℃,保温 1 h 后水冷,随后将试样再次放入加热炉中以 10 ℃/min 升温速率放入炉中加热至 450 ℃保温 4 h,然后取出试样放置在空气中进行冷却。

表 2　热处理工艺

Tab. 2　Heat treatment process

| 工艺序号 | 固溶温度/℃ | 保温时间/h | 冷却方式 | 时效温度/℃ | 保温时间/h | 冷却方式 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | – | – | – | – | – | – |
| 2 | – | – | – | 450 | 4 | 空冷 |
| 3 | 920 | 1 | 水冷 | 450 | 4 | 空冷 |
| 4 | 960 | 1 | 水冷 | 450 | 4 | 空冷 |

## 1.2　实验装置

采用 SHPB 实验装置开展动态力学性能测试。图 1、图 2 分别为装置实物图和原理图。该装置由加载系统、杆系统和测试系统组成。杆系统包含冲击杆(200 mm)、入射杆(1 000 mm)、透射杆(1 000 mm)和吸收杆(600 mm),杆径均为 14.5 mm,材料为 55CrSi 弹簧钢,弹性模量为 210 GPa,密度为 7.85 g/cm$^3$,波速约为 5 100 m/s。测试系统包含应变片、超动态应变仪和数据采集装置。实验时将试样置于入射杆与透射杆之间,为减少入射杆、透射杆与试样端面之间摩擦,采用凡士林对试样接触面进行润滑。



图 1　SHPB 装置实物图

Fig. 1　Physical picture of SHPB device

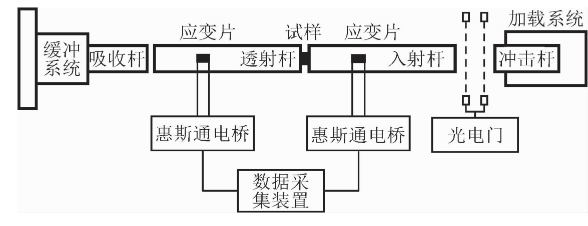



图 2　SHPB 装置原理图

Fig. 2　Schematic diagram of SHPB device

采用 SHPB 实验装置开展动态力学性能测试需要满足 2 个假定,即一维应力波假定和均匀性假定。为满足一维应力波假定,设置入射杆和透射杆长径比大于 20,入射杆长度为冲击杆的 5 倍,将应变片置于入射杆与透射杆中间位置,且与杆两端的距离均大于 10 倍杆径。

以加载应变率 2 000 s$^{-1}$ 为例,得到试样动态压缩原始波形(图 3)及其应力平衡图(图 4)。

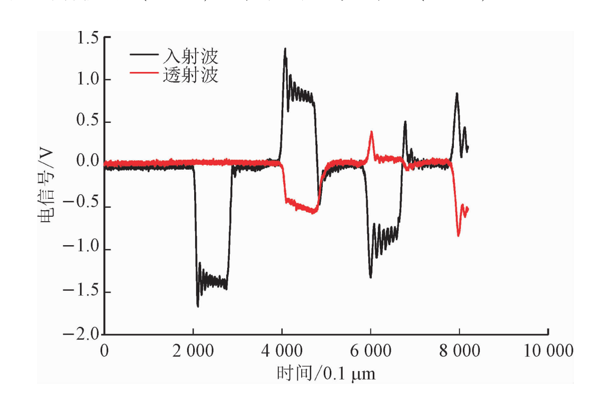



图 3　应变率 2 000 s$^{-1}$时试样动态压缩原始波形

Fig. 3　Original waveform of dynamic compression of specimen at strain rate of 2 000 s$^{-1}$

图 4 中,入射杆与试样界面的应力时间曲线由入射信号与反射信号累加后计算得到,透射杆与试样界面的应力时间曲线由透射信号计算得到,图中可见,试样在整个加载过程中达到了应力平衡,符合均匀性假定。

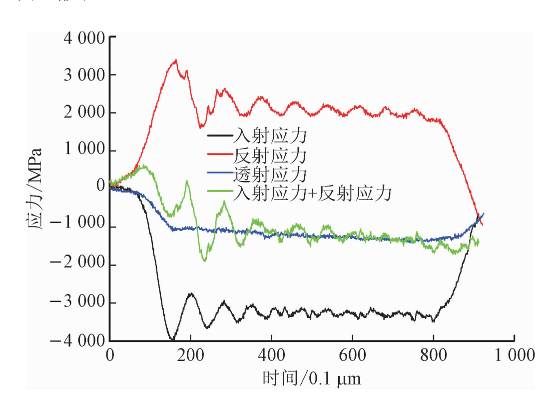



图 4　应变速率 2 000 s$^{-1}$时的应力平衡图

Fig. 4　Stress balance diagram at strain rate of 2 000 s$^{-1}$

为研究材料高应变率加载下的力学性能,实验过程中,通过调整加载系统气压,改变冲击杆速度,以实现不同应变率加载。结合一维应力波理论可以计算得到试样的平均工程应变率 $\dot{\varepsilon}(t)$ 、平均工程应变 $\varepsilon(t)$ 和应力 $\sigma(t)$ 的关系,如公式(1)所示。

$$\begin{cases}\dot{\varepsilon}(t) = \dfrac{c_0}{l_0}(\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) \\ \sigma(t) = \dfrac{AE}{2A_0}(\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \\ \varepsilon(t) = \dfrac{c_0}{l_0}\int_0^t(\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t)\mathrm{d}t\end{cases} \tag{1}$$

式中：$\varepsilon_i$、$\varepsilon_r$ 和 $\varepsilon_t$ 分别为试验测得的入射应变、反射应变和透射应变；$c_0$ 为压杆的弹性波速（单位：m/s）；$E$、$A$ 分别为压杆的弹性模量（单位：GPa）和杆的横截面积（单位：$mm^2$）；$A_0$、$l_0$ 分别为试样的面积（单位：$mm^2$）和长度（单位：mm）。

## 2　实验结果及分析

### 2.1　实验过程

依照表 2 所述热处理工艺对试样进行处理，获取了对应于工艺 1 ~ 4 的 4 组试样（每组 16 个试样），实验前从各组试样中抽取 1 个试样进行 XRD 测试及金相分析。对各组试样开展应变率为 1 500、2 000、2 500、3 000 和 4 000 $s^{-1}$ 的力学性能实验，每次实验重复 3 次，取平均值。对高应变率加载后的试样进行回收，统计各试样的压缩率。

### 2.2　压缩率统计

图 5 为高应变率加载下 4 组试样的压缩率。试样经工艺 2 处理后平均压缩率比未处理试样减少了 1.5%，表明试样抗变形能力得到提升；工艺 3 处理后试样压缩率比未处理试样增加了 2.5%，表明试样抗变形能力低于未处理试样；工艺 4 处理后试样压缩率最高，表明试样抗变形能力最差。

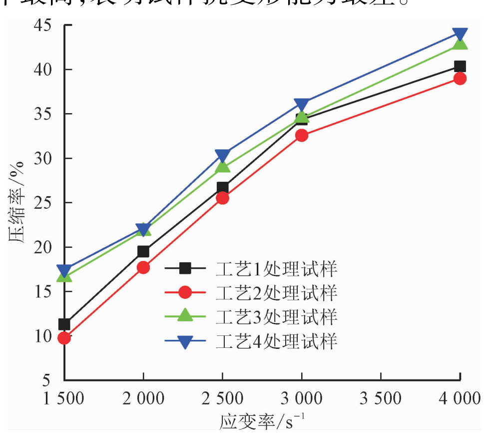



图 5　4 组试样在 5 种应变率下的压缩率

Fig. 5　Compressibility of four groups of specimens at five strain rates

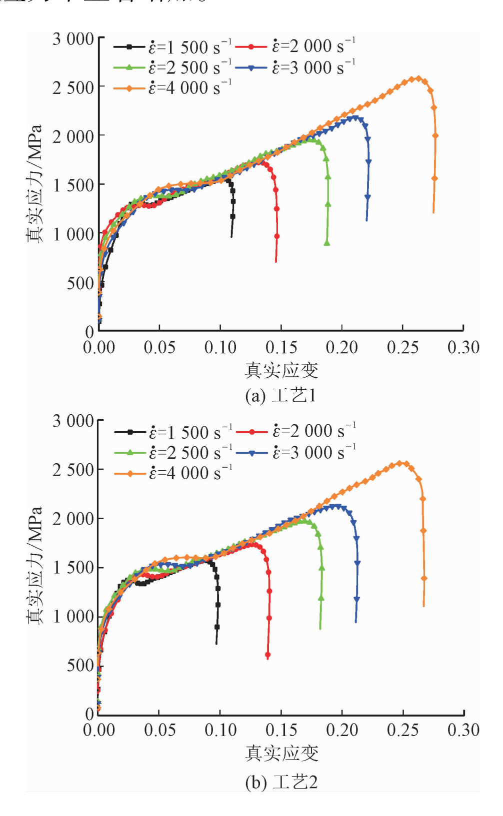
### 2.3　动态力学性能分析

通过动态力学性能测试，获取上述 4 组试样在 5 种应变率下的工程应力应变曲线。依据体积不变假设，按公式（2）将所得到的工程应力应变数据转化为真应力应变数据。

$$\begin{cases}\sigma = \sigma_e(1 + \varepsilon_e) \\ \varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_e)\end{cases} \tag{2}$$

式中：$\varepsilon_e$ 工为工程应力；$\sigma_e$ 工为工程应变；$\sigma$ 为真实应力；$\varepsilon$ 为真实应变。

图 6 为 4 组试样在 1 500 ~ 4 000 $s^{-1}$ 应变率下的真应力应变曲线。图 6(a)、(b)、(c)、(d) 分别对应热处理工艺 1 ~ 4，图 6(a)、(b) 可见，未进行热处理的试样与时效处理后的试样其应力-应变曲线均具有明显的弹性、屈服和塑性阶段，且屈服强度随应变率的增加而增加。图 6(c)、(d) 中可看出，试样经固溶时效处理后，应力-应变曲线无明显弹性和屈服阶段。TC4 钛合金表现出了一定的应变率强化效应，各组试样的峰值应力随应变率增加而显著增大。材料经固溶时效处理后的流动应力随着应变率增加而增大，而未进行热处理的试样与时效处理后的试样流动应力未显著增加。



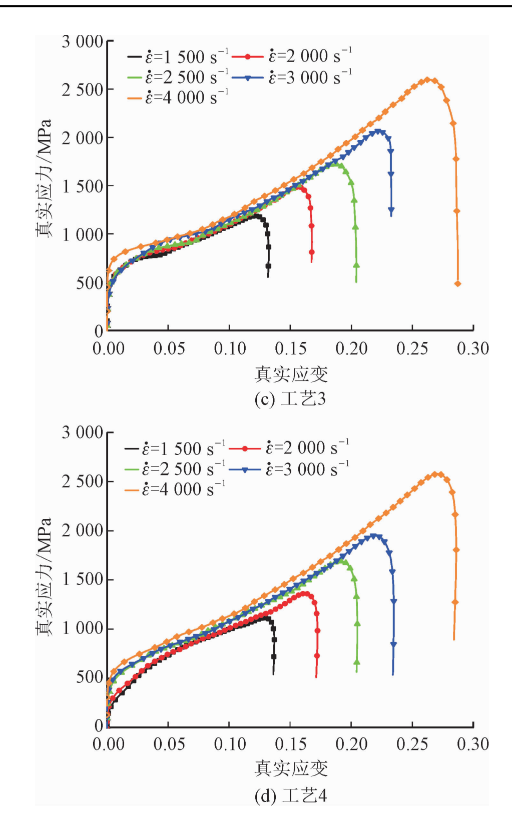



图 6　4 组试样在 5 种应变率下的动态真应力-应变曲线

Fig. 6　Dynamic true stress-strain curves of four groups of specimens at five strain rates

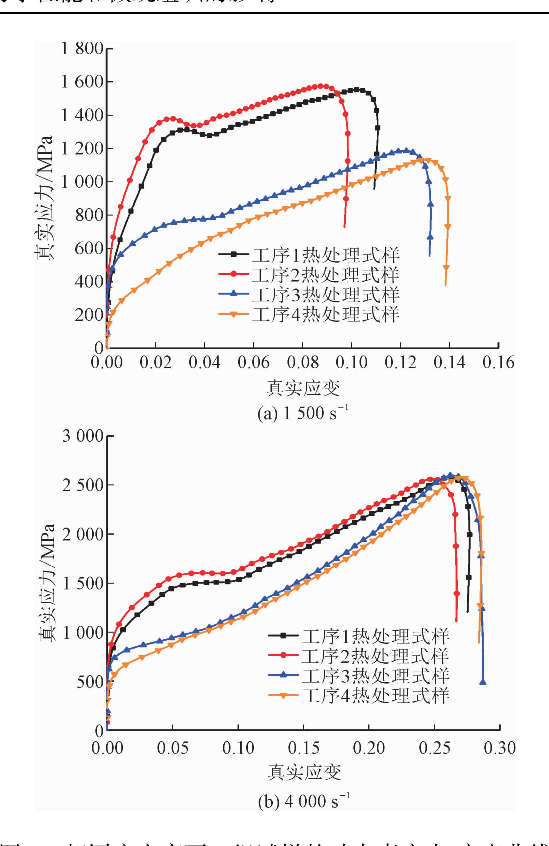



图 7　相同应变率下 4 组试样的动态真应力-应变曲线

Fig. 7　Dynamic true stress-strain curves of four groups of specimens at the same strain rate

此外，实验中还发现，TC4 钛合金试样动态塑性变形过程中温度急剧升高，这是由于高应变率短历时加载，试样内部热能无法及时释放所致。高应变率加载过程中同时存在应变率硬化与热软化效应。

## 2.4　流动应力、屈服强度及抗压强度分析

图 7 为 1 500 $s^{-1}$ 与 4 000 $s^{-1}$ 应变率下 4 组试样的真实应力-应变曲线。由图 7 可知，工艺 2 处理后的试样对应的流动应力最高，材料经工艺 3 处理后流动应力显著减小，当固溶温度达到 960 ℃时，试样的流动应力最低。上述结论同样适用于加载应变率为 2 000、2 500 和 3 000 $s^{-1}$ 的情况。

为进一步分析流动应力随应变率的变化规律，取应变为 0.09 时的流动应力和应变率值绘制关系曲线（图 8）。未做热处理的试样与工艺 2 处理后的试样其流动应力始终保持在 1 500 MPa 和 1 600 MPa 上下，无显著变化；而经过工艺 3 和工艺 4 处理后的试样，其流动应力随应变率增加总体呈上升趋势，应变率为 1 500 $s^{-1}$ 和 2 000 $s^{-1}$ 时，流动应力变化不明显。

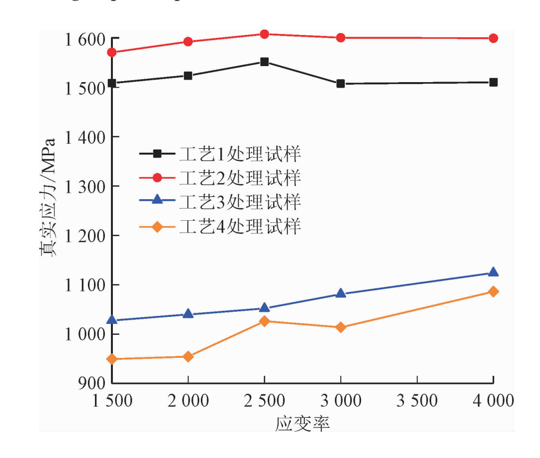



图 8　4 组试样的流动应力-应变率关系曲线

Fig. 8　The flow stress-strain rate curves of four groups of specimens

图 9 为不同热处理试样的屈服强度-应变率关系曲线，图中可见，对应于 4 种热处理工艺，TC4 钛合金试样屈服强度均随应变率增加而增加。在 3 000 $s^{-1}$ 应变率以上时试样屈服强度增幅减缓，随应变率的增加，材料的热软化效应增强；固溶时效处理后的试样屈服阶段不明显，当固溶温度达到 960 ℃时，试样未见屈服阶段。

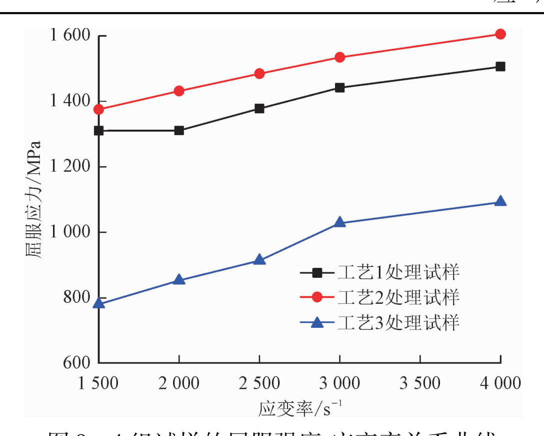



图 9 4 组试样的屈服强度-应变率关系曲线

Fig. 9 Yield strength-strain rate curves of four groups of specimens

图 10 为 4 组试样在 5 种应变率下的抗压强度，总体来看，试样经工艺 2 处理后抗压强度略有提升；工艺 3 处理后试样抗压强度低于未处理试样；工艺 4 处理后试样抗压强度最低。在加载应变率为 4 000 $s^{-1}$时，4 组试样抗压强度均达到了最高值(2 576 ± 20) MPa。试样经固溶处理后淬火得到亚稳 β 相，亚稳 β 相在高应变率下发生应力诱发马氏体转变，该马氏体具有低屈服强度和高应变硬化速率特点。因此，随应变率增加，工艺 3 和工艺 4 处理后试样抗压强度显著增强，使 4 组试样的抗压强度差值不断缩小。

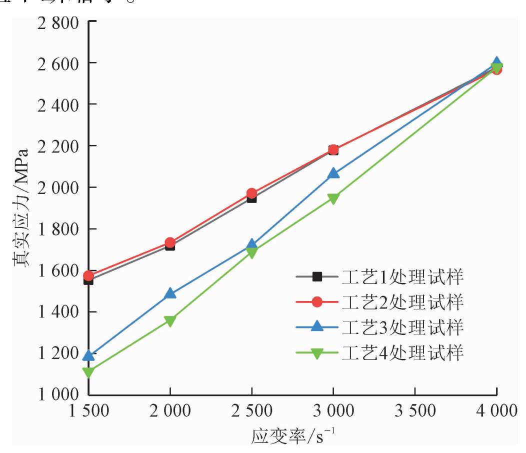



图 10 4 组试样在 5 种应变率下的抗压强度

Fig. 10 The compressive strength of four groups of specimens at five strain rates

## 2.5 XRD 分析

图 11 为 4 组试样的 XRD 图谱。图 11 中(a)、(b)、(c)、(d)分别对应工艺 1 ~ 4 热处理试样的 XRD 图谱，由图可知，4 组试样均具有多角度 α 相衍射峰。图谱(a)中，β 相衍射峰显著，说明试样中残留的 β 相较多且小范围聚集。图谱(b)中 β 相衍射峰消失，这是由于时效处理后 β 相含量减少，散布于 α 相晶界间难以生成特定 β 相晶面指数的衍射所致。图谱(c)、(d)中可见，固溶时效处理后，XRD 图谱中新增了 β 相衍射峰，这是由于相变点附近 α 相向 β 相转变所致，同时 α 相晶界增大，β 相中析出了针状 α 相，导致对应于 α 相的衍射峰增强。

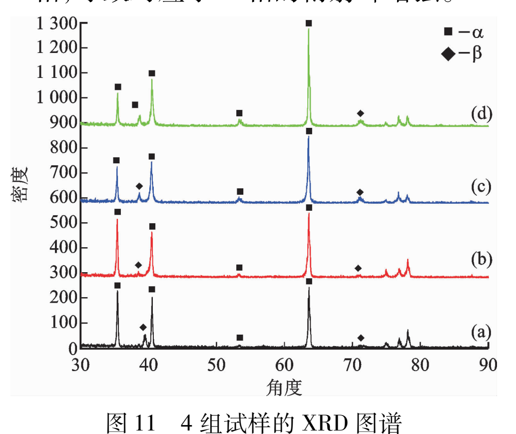



图 11 4 组试样的 XRD 图谱

Fig. 11 XRD patterns of four groups of specimens

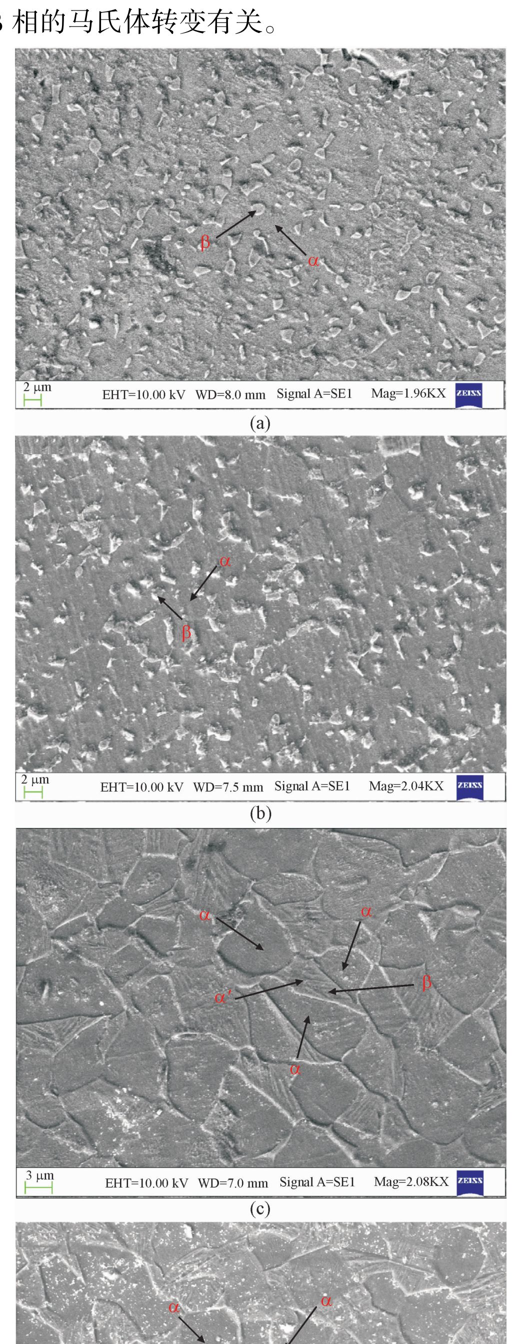
## 2.6 金相分析

采用 SEM 扫描电镜(EVO18，蔡司)观测试样金相组织，如图 12 所示。图 12(a)、(b)、(c)、(d)分别对应工艺 1 ~ 4 热处理试样，图 12(a)金相组织由初生等轴 α 相和少量 β 相组成；图 12(b)金相组织由等轴初生 α 相和在晶界处转变的 β 相组成；图 12(c)、(d)金相组织均由等轴初生 α 相和含有针状 α 的 β 转变基体组成。

由图 12(a)、(b)可知，工艺 2 处理后试样的等轴初生 α 相比未处理试样的等轴初生 α 相明显增大；图 12(c)可以看出，工艺 3 处理后，其 α 相变为片层状且晶界处转变的 β 相中伴有少量针状 α 相(马氏体 α′)析出，其长度约为 3 ~ 6 μm；图 12(d)显示，工艺 4 处理后，试样金相组织的片层状 α 相更显著，并伴有长度约为 5 μm 的 α 相析出，体积约占金相组织的 40% 左右。对比图 12(b)和图 12(c)、(d)可以看出，固溶处理会使 α 相晶粒变得粗大，并呈现出片层状组织。而随着固溶温度的增大，β 相从 α 相与 α 相之间的晶界中析出，导致 β 相含量增加。图 12(c)、(d)表明，在固溶温度低于相变点温度(980 ± 20) ℃或者接近相变点时，试样金相组织均为明显的双态组织。

与工艺 1 相比，工艺 2 处理后试样等轴初生 α 相显著增大且 β 相含量较低，导致其抗压强度、流动应力及屈服强度增加。工艺 3、4 处理后，试样的抗

压强度、流动应力及屈服强度均降低，这与 β 相和亚稳 β 相的马氏体转变有关。




(a)

(b)

(c)

(d)

图 12　4 组试样的金相组织

Fig. 12　The metallographic structure of four groups of specimens

工艺 3 和 4 处理时，随固溶温度升高，发生 α 相向 β 相转变，等轴初生 α 相比例逐渐减少，次生 α 相（马氏体 α′）增加。此外，试样经固溶处理后淬火，β 相发生马氏体转变，该马氏体对材料的强化作用小，而时效处理进一步将得到的马氏体分解为弥散的 α 和 β 组织，可以起到增强强度、降低塑性的作用。同时，试样经固溶处理后淬火得到的亚稳 β 相，在高加载应变率下发生应力诱发马氏体转变，使固溶时效处理后的试样强度降低，但抗压强度随加载应变率增加而增强。

## 3　结　论

本研究分析了热处理对 TC4 钛合金在高应变率下的力学性能和微观组织的影响，得出以下结论。

1）TC4 钛合金在高应变率载荷作用下表现出了应变率强化效应，其峰值应力随应变率增加而显著增大。

2）各加载应变率下，时效处理后 TC4 钛合金抗变形能力、流动应力、屈服强度及抗压强度升高；固溶时效处理后材料的抗变形能力、流动应力、屈服强度及抗压强度显著降低；时效处理和未做热处理试样其动态应力-应变曲线均具有明显的弹性、屈服和塑性阶段，固溶时效处理后则无明显弹性和屈服阶段。

3）随应变率的增加，时效处理和未做热处理试样流动应力无显著变化；固溶时效处理后流动应力随应变率增加呈上升趋势。

4）时效处理后，材料等轴初生 α 相显著增大且 β 相含量较低；固溶时效处理后，材料 α 相晶界增大且含有针状 α 的 β 转变基体，TC4 钛合金的力学性能与 β 相和亚稳 β 相的马氏体转变有关。

### 参考文献：

[1]　JIANG X J, CHEN G Y, MEN X L, et al. Ultrafine duplex microstructure and excellent mechanical properties of TC4 alloy via a novel thermo-mechanical treatment[J]. Journal of alloys and compounds, 2018, 767: 617-621.

[2]　WANG Y J, HAO E K, ZHAO X Q, et al. Effect of microstructure evolution of Ti6Al4V alloy on its cavitation erosion and corrosion resistance in artificial seawater[J]. Journal of materials science & technology, 2022, 100: 169-181.

[3]　LI G R, QIN T, FEI A G, et al. Performance and microstructure of TC4 titanium alloy subjected to deep cryogenic treatment and magnetic field[J]. Journal of alloys and compounds, 2019, 802: 50-69.

[4]　朱冠芳，李春旺，武晓亮，等. 外物撞击 TC4 钛合金叶片 Cowper-Symonds 模型参数反演[J]. 应用力学学报，2019，36(4)：

945-950.

ZHU Guanfang, LI Chunwang, WU Xiaoliang, et al. The TC4 alloys parameter inversion of cowper-symonds model[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2019, 36(4): 945-950(in Chinese).

[5] LEE S W, PARK C H, HONG J K, et al. Effect of solution treatment and aging conditions on tensile properties of Ti-Al-Fe-Si alloy [J]. Materials science and engineering: A, 2017, 697: 158-166.

[6] 袁经纬,李卓,汤海波,等. 热处理对激光增材制造TC4合金耐蚀性及室温压缩蠕变性能的影响[J]. 航空学报, 2021, 42(10): 471-478.

YUAN Jingwei, LI Zhuo, TANG Haibo, et al. Effect of heat treatment on corrosion resistance and room temperature compression creep of lamed TC4 alloy[J]. Acta aeronautica et astronautica Sinica, 2021, 42(10): 471-478(in Chinese).

[7] CHEN Z Q, XU L J, LIANG Z Q, et al. Effect of solution treatment and aging on microstructure, tensile properties and creep behavior of a hot-rolled β high strength titanium alloy with a composition of Ti-3.5Al-5Mo-6V-3Cr-2Sn-0.5Fe-0.1B-0.1C[J]. Materials science and engineering: A, 2021, 823: 141728.

[8] 邓云飞,张永,安静丹,等. TC4钛合金力学性能测试及其本构关系研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(18): 70-77.

DENG Yunfei, ZHANG Yong, AN Jingdan, et al. Mechanical properties and constitutive relationship of TC4 titanium alloy[J]. Journal of vibration and shock, 2020, 39(18): 70-77(in Chinese).

[9] 惠旭龙,牟让科,白春玉,等. TC4钛合金动态力学性能及本构模型研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(22): 161-168.

HUI Xulong, MU Rangke, BAI Chunyu, et al. Dynamic mechanical property and constitutive model for TC4 titanium alloy[J]. Journal of vibration and shock, 2016, 35(22): 161-168(in Chinese).

[10] PENG X N, GUO H Z, SHI Z F, et al. Constitutive equations for high temperature flow stress of TC4-DT alloy incorporating strain, strain rate and temperature[J]. Materials & design, 2013, 50: 198-206.

[11] 丁灿,汪常亮,李峰,等. 固溶-冷速-时效对TC4-DT合金显微组织和力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(3): 962-967.

DING Can, WANG Changliang, LI Feng, et al. Effects of solid solution, cooling rates and aging treatments on microstructure and mechanical properties of TC4-DT alloy[J]. Rare metal materials and engineering, 2020, 49(3): 962-967(in Chinese).

[12] 刘婉颖,朱毅科,林元华,等. 热处理对TC4钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. 材料导报, 2013, 27(18): 108-111.

LIU Wanying, ZHU Yike, LIN Yuanhua, et al. Influence of heat treatment on microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy[J]. Materials review, 2013, 27(18): 108-111(in Chinese).

[13] SUN Z C, MAO X J, WU H L, et al. Tri-modal microstructure and performance of TA15 Ti-alloy under near-β forging and given subsequent solution and aging treatment[J]. Materials science and engineering: A, 2016, 654: 113-123.

[14] GALARRAGA H, WARREN R J, LADOS D A, et al. Effects of heat treatments on microstructure and properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM)[J]. Materials science and engineering: A, 2017, 685: 417-428.

[15] 吕逸帆,张毅,景宝全,等. 固溶时效对TC4ELI钛合金组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(增刊1): 616-619.

LÜ Yifan, ZHANG Yi, JING Baoquan, et al. Effects of solution treatment on microstructure and properties of TC4ELI titanium alloy [J]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2010, 20(S1): 616-619(in Chinese).

[16] 鲁媛媛,马保飞,刘源仁. 时效处理对TC4钛合金微观组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(7): 34-38.

LU Yuanyuan, MA Baofei, LIU Yuanren. Influence of aging treatment on microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy[J]. Heat treatment of metals, 2019, 44(7): 34-38(in Chinese).

[17] PENG X N, GUO H Z, WANG T, et al. Effects of β treatments on microstructures and mechanical properties of TC4-DT titanium alloy [J]. Materials science and engineering: A, 2012, 533: 55-63.

[18] HUA K, ZHANG Y L, ZHANG F, et al. Microstructure refinement and enhanced wear-resistance modulated by stress relaxation processing in a metastable β titanium alloy[J]. Materials characterization, 2021, 181: 111505.

[19] XU K H, XUE Y, ZHANG Z M, et al. The effect of heat treatment on α/β phases evolution of TC4 titanium alloy fabricated by spark plasma sintering[J]. Procedia manufacturing, 2020, 50: 713-718.

[20] 张昭,郭保桥,冉春,等. 固溶温度对TB6钛合金动态力学性能和微观组织的影响[J]. 高压物理学报, 2021, 35(6): 105-111.

ZHANG Zhao, GUO Baoqiao, RAN Chun, et al. Effect of solution temperature on dynamic mechanical properties and microstructure of TB6 titanium alloy[J]. Chinese journal of high pressure physics, 2021, 35(6): 105-111(in Chinese).

[21] 彭美旗,程兴旺,郑超,等. 转变β区体积分数对双态组织TC4钛合金动态压缩性能及其绝热剪切敏感性的影响规律[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(8): 2227-2233.

PENG Meiqi, CHENG Xingwang, ZHENG Chao, et al. Effects of volume fraction of transformed β matrix on dynamic mechanical properties and sensitivity of adiabatic shear banding in bimodal microstructures of TC4 alloy[J]. Rare metal materials and engineering, 2017, 46(8): 2227-2233(in Chinese).

[22] PENG X N, GUO H Z, SHI Z F, et al. Microstructure characterization and mechanical properties of TC4-DT titanium alloy after thermomechanical treatment[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(3): 682-689.

[23] 王悔改,张楠,张雷雨,等. 热处理工艺对Ti-53合金显微组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2012, 37(9): 110-112.

WANG Huigai, ZHANG Nan, ZHANG Leiyu, et al. Effects of heat treatment process on microstructure and mechanical properties of Ti-53 alloy[J]. Heat treatment of metals, 2012, 37(9): 110-112 (in Chinese).

[24] ZHOU X, XU D K, GENG S J, et al. Microstructural evolution and

corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy fabricated by laser metal deposition for dental applications[J]. Journal of materials research and technology, 2021, 14: 1459-1472.

[25] ZHOU X, ZHANG M X, XU D K, et al. Microstructural evolution, corrosion behavior and cytotoxicity of Ti-6Al-4V/$ZrO_2$ composite fabricated by directed energy deposition for implant biomaterial [J]. Journal of alloys and compounds, 2022, 892: 161820.

[26] JU J, LI J J, JIANG M, et al. Microstructure and electrochemical corrosion behavior of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy in simulated artificial saliva[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(1): 167-177.

[27] CHEN J W, ZHANG C H, ZHOU F Q, et al. Microstructural, electrochemical and wear-corrosion characterization of TC4-5Cu alloy fabricated by selective laser melting[J]. Journal of alloys and compounds, 2021, 874: 159953.

[28] 骆雨萌，刘金旭，李树奎，等. 热轧 TC4 钛合金力学性能各向异性及影响因素分析[J]. 稀有金属材料与工程，2014，43(11)：2692-2696.
LUO Yumeng, LIU Jinxu, LI Shukui, et al. Anisotropy of mechanical properties and influencing factors of hot rolling TC4 titanium alloy[J]. Rare metal materials and engineering, 2014, 43(11): 2692-2696(in Chinese).

[29] 徐戊矫，谭玉全，龚利华，等. 退火温度和冷却速率对 TC4 钛合金组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程，2016，45(11)：2932-2936.
XU Wujiao, TAN Yuquan, GONG Lihua, et al. Effect of annealing temperature and cooling rate on microstructure and properties of TC4 titanium alloy[J]. Rare metal materials and engineering, 2016, 45(11): 2932-2936(in Chinese).

[30] 戴世娟，王煜，陈锋，等. 退火工艺对大形变冷轧 Ti-35Nb-9Zr-6Mo-4Sn 医用钛合金组织和力学性能的影响[J]. 材料工程，2013(11)：20-25.
DAI Shijuan, WANG Yu, CHEN Feng, et al. Effect of annealing process on microstructure and mechanical properties of cold rolled Ti-35Nb-9Zr-6Mo-4Sn biomedical titanium alloy with large reduction[J]. Journal of materials engineering, 2013(11): 20-25(in Chinese).

[31] 宗学文，刘文杰，张健，等. 激光选区熔化与铸造成形 TC4 钛合金的力学性能分析[J]. 材料导报，2020，34(16)：16083-16086.
ZONG Xuewen, LIU Wenjie, ZHANG Jian, et al. Analysis of mechanical properties of TC4 titanium alloy formed by laser selective melting and casting[J]. Materials reports, 2020, 34(16): 16083-16086(in Chinese).

（编辑　史淑英）